فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال چهارم/ شماره ۱۳/ زمستان ۱۳۹۷/ صفحات ۴۰-۷

تحلیل ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی: کاربرد نظریه شبکه پیچیده

علی حسین صمدی
دانشیار اقتصاد، دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)
asamadi@rose.shirazu.ac.ir
ستاره زاهدی
کارشناس ارشد اقتصاد، دانشگاه شیراز
szahedi89@gmail.com

در این مطالعه با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌های توپولوژی و ثبات تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) در مقابل اختلال تجاری مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه تجاری گاز طبیعی به ساختار شبکه‌های مقیاس آزاد با ویژگی ناهمگنی نزدیک‌تر است. نتایج انعطاف پذیری بیشتر کشورها در برقراری ارتباط و تجارت با یکدیگر در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله را تأیید می‌کنند. امنیت عرضه و ثبات کشورهای وارد کننده گاز طبیعی در برابر اختلال تجاری، نه تنها بستگی به متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی دارد، بلکه بستگی به ایجاد رابطه تجاری با کشورهای صادر کننده دارای شرایط باثبات سیاسی نیز دارد. به‌علاوه، شبکه تجاری گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) در برابر اختلال تجاری تصادفی مقاوم، اما در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر است. آسیب‌پذیری شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله در برابر اختلال تجاری در شبکه بیشتر است.

واژگان کلیدی: الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی، ثبات تجاری، شبکه پیچیده، اختلال تجاری تصادفی، حمله هدف

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷ /۷/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

۱. مقدمه

شبکه‌های تجاری با دو رویکرد متفاوت بررسی‌شده‌اند: الگوی جاذبه و الگوهای شبکه پیچیده. در مطالعات با چارچوب الگوی جاذبه (مانند گرینی[1]، ۲۰۰۵؛ دوانـاس و فـاگیولو[2]، ۲۰۱۱؛ لـی[3]، ۲۰۱۲؛ و اسگریگنولی[4] و همکاران، ۲۰۱۵) عوامل مؤثر بر جریان‌های تجاری در شبکه‌های تجاری بررسی‌شده است. در این مطالعات اثرات شبکه برافزایش تجارت، ویژگی‌های توپولوژی و آماری شبکه وزنی تجارت جهانی، ارتباط بین مهاجرت جهانی و شبکه‌های تجاری و همچنین همسایه‌های کشورهای با بیشترین شدت روابط در شبکه تجاری و به‌علاوه فرایند جهانی‌شدن و همگرایی اقتصادی مورد بررسی قرارگرفته است. هدف اصلی این مطالعات بررسی ساختار تجارت جهانی با استفاده از شبکه‌های وزن‌دار بوده است.

مطالعات با چارچوب الگوهای شبکه پیچیده را می‌توان به مطالعات مربوط به شبکه تجارت کالاها و خدمات و شبکه تجارت انرژی (نفت و گاز) تقسیم کرد. در مطالعات مربوط به شبکه تجارت کالاها و خدمات (ازجمله مطالعات اسمیت و وایت[5]، ۱۹۹۲؛ سرانو و بگونا[6]، ۲۰۰۳؛ لی[7] و همکاران، ۲۰۰۳؛

گارلاسچلی و لفردو[8]، ۲۰۰۵؛ کالی و ریز[9]، ۲۰۰۶؛ فورو ساوا و کنیشی[10]، ۲۰۰۷؛ باتاچاریا[11] و همکاران، ۲۰۰۸؛ فاگیولو[12] و همکاران، ۲۰۰۸؛ باسکران[1] و همکاران، ۲۰۱۱؛

1. Greaney
2. Duenas and Fagiolo
3. Lee
4. Sgrignoli
5. Smith and White
6. Serrano and Boguna
7. Li
8. Garlaschelli and Loffredo
9. Kali and Reyes
10. Furusawa and Konishi
11. Bhattacharya
12. Fagiolo

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

ژانگ[۲] و همکاران،۲۰۱۳؛ فن[۳] و همکاران، ۲۰۱۴؛ و شیرازی و همکاران، ۱۳۹۴)، به تحلیل ساختار شبکه تجارت جهانی و روابط مبادله‌ای بین کشورها پرداخته‌شده است. نتایج این پژوهش‌ها حکایت از آن دارد که شبکه تجارت جهانی کالاها و خدمات ویژگی شبکه‌های مقیاس آزاد را دارد و بیشتر رئوس در آن دارای ضریب خوشه بالا هستند که بیان‌گر شدت روابط تجاری بالا است. همچنین ویژگی‌های توپولوژی شبکه تجارت جهانی به تولید ناخالص داخلی کشورهای جهان مرتبط است. این ویژگی می‌تواند از طریق فرایند توزیع ثروت بین کشورها با استفاده از جریان تجارت، مورد بررسی قرار گیرد.

مطالعات انجام‌شده درزمینه شبکه‌های تجارت نفت (مانند آن[۴] و همکاران، ۲۰۱۴؛ جی[۵] و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژنگ[۶] و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژونگ[۷] و همکاران، ۲۰۱۴؛ دو[۸] و همکاران، ۲۰۱۶؛ دو و همکاران، ۲۰۱۷؛ سان[۹] و همکاران، ۲۰۱۷) و گاز (مانند شافر[۱۰]، ۲۰۱۲؛ گنگ[۱۱] و همکاران، ۲۰۱۴؛ و ناگایاما و هوریتا[۱۲]، ۲۰۱۴) بر تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های این شبکه‌ها متمرکزشده است. در این پژوهش‌ها، عوامل مؤثر بر ثبات عرضه انرژی (نفت و گاز) شناسایی و این نتیجه حاصل شده است که اختلال تجاری بر ثبات شبکه تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه نتایج بیان‌گر این مطلب است که کشورها در شبکه مبتنی بر واردات نسبت به شبکه مبتنی بر صادرات، باثبات‌تر هستند. همچنین کشورهای اصلی وارد کننده نقش مؤثرتری در شبکه تجاری ایفا می‌کنند.

1. Baskaran
2. Zhang
3. Fan
4. An
5. Ji
6. Zhang
7. Zhong
8. Due
9. Sun
10. Shaffer
11. Geng
12. Nagayama and Horita

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

پژوهش حاضر با توجه به مقاله جی و همکاران (۲۰۱۴) که در رابطه با شناسایی الگوی تجارت جهانی نفت و بررسی ثبات شبکه تجارت نفت است، به تجزیه‌وتحلیل و مقایسه ساختار شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی می‌پردازد. همچنین از برخی شاخص‌های اندازه‌گیری مربوط به شبکه تجاری با توجه به مقاله گنگ و همکاران (۲۰۱۴) که در رابطه با بررسی ساختار و ادغام بازارهای شبکه تجارت جهانی گاز است، استفاده‌شده است. دستاورد مقاله حاضر آن است که با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، موقعیت و ثبات کشورها و ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) را در مواجهه با اختلال عرضه در کشورهای مهم صادرکننده گاز طبیعی بررسی کرده است.

مقاله حاضر در چهار قسمت تنظیم‌شده است. در بخش دوم روش‌شناسی تحقیق ارائه‌شده است. در بخش سوم، نتایج تجربی این پژوهش ارائه‌شده است. مهم‌ترین بخش ساختار کلی شبکه با توجه به ویژگی توزیع‌های به‌دست‌آمده و اتصالات شبکه بررسی‌شده و با ساختار کلی شبکه‌های تصادفی و مقیاس آزاد مقایسه شده است. همچنین با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌های تکاملی الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده)، از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ تحلیل و مقایسه شده است. همچنین موقعیت و اهمیت کشورهای تجاری در شبکه و ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی (به هر دو شیوه انتقال) در مقابل حمله هدف و حمله تصادفی موردبحث قرارگرفته است. در آخر به‌منظور تجسم بهتر شبکه، شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ ترسیم و دو شبکه مذکور، مورد بررسی قرارگرفته است. بخش آخر به نتیجه‌گیری اختصاص داده‌شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

۲. روش‌شناسی

در حوزه گاز طبیعی، بخش عمده‌ای از مطالعات انجام‌شده به دنبال ارائه و تحلیل الگوی جامع و کلی برای بازارهای منطقه‌ای گاز طبیعی بوده‌اند. الگوی تجارت جهانی گاز رایس[1]، الگوی سرمایه‌گذاری در تجهیزات انتقال گاز طبیعی به بازارهای هدف[2] و الگوی جهانی گاز[3] برخی از مهم‌ترین الگوهای بازار گاز طبیعی به شمار می‌روند. در این قسمت به‌طور خلاصه به ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی اشاره‌شده و برخی از شاخص‌های اندازه‌گیری ثبات تجاری مربوط به شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی ارائه می‌شود[4].

۲-۱. ویژگی‌های توپولوژی شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی

شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی، جریان تجاری میان کشورهای دارنده منابع گازی است. براساس نظریه شبکه پیچیده، شبکه تجارت جهانی گاز را می‌توان با مجموعه $G = (V, E)$ نشان داد. در این مجموعه، کشورهای تجاری $V = \{v_1,v_2,\ldots,v_N\}$ به‌عنوان رئوس شبکه و جریان تجاری $E = \{e_1,e_2,\ldots,e_M\}$ به‌عنوان اتصالات شبکه در نظر گرفته می‌شوند. ماتریس مجاورت $A(G)$ برای گراف G یک ماتریس $v\times v$ است و a_{ij} درایه موردنظر در این ماتریس است. زمانی که جریان تجاری از i به j وجود داشته باشد $a_{ij}=1$ است و در غیر این صورت $a_{ij}=0$ است؛ بنابراین درجه، تعداد اتصالاتی است که هر رأس در شبکه دارد و برای رأس i با k_i نشان داده می‌شود. در شبکه‌های جهت‌دار، دو سنجه درجه وجود دارد: درجه ورودی (تعداد اتصالاتی که از رئوس دیگر به یک رأس اشاره دارند) و درجه خروجی (تعداد اتصالاتی که از یک رأس

1. The Rice World Gas Trade Model (RWGTM)
2. Investments into Transmission Facilities of Natural Gas on the Market Outcome (InTraGas)
3. World Gas Model (WGM)
۴. برای مطالعه بیشتر جزئیات فرمول‌ها به جی و همکاران (۲۰۱۴) و گنگ و همکاران (۲۰۱۴) مراجعه کنید.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

منشأ می‌گیرند و به رئوس دیگر اشاره دارند). نحوه محاسبه این درجه‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

در شبکه اصلی تجارت گاز درجه رئوس تجاری، با تعداد شرکای تجاری با روابط مهم تجاری، اندازه‌گیری می‌شود. به‌علاوه، در شبکه‌ها تفاوت در حجم تجارت منجر به این می‌شود که هر اتصال تأثیر متناقض بر شبکه تجارت بگذارد. در اینجا حجم تجارت از رأس i به رأس j به‌عنوان وزن اتصالات در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. شاخص‌های مربوط به درجه شبکه

درجه خروجی کشورها (K_i^{out})	$i = v_1, v_2, \ldots, v_N$	$K_i^{out} = \sum_{j=1}^{v_N} a_{ij}$
درجه ورودی کشورها (K_j^{in})	$j = v_1, v_2, \ldots, v_N$	$K_j^{in} = \sum_{i=1}^{v_N} a_{ji}$

مأخذ: نتایج تحقیق

در یک شبکه با n رأس، توزیع درجه شبکه یعنی p(k) (احتمال این‌که یک رأس در شبکه دارای درجه k باشد)، ویژگی‌های توزیعی تعداد اتصالات رأس و همچنین ناهمگنی رأس را توصیف کرده و به‌صورت $P(k) = \frac{n_k}{n}$ تعریف می‌شود؛ که در آن n_k تعداد رئوس با درجه k و n تعداد کل رئوس در شبکه است. اگر توزیع درجه از توزیع پوآسن پیروی کند، نشان‌دهنده آن است که رئوس در شبکه دارای درجه یکسان و درنتیجه ویژگی‌های همگن هستند و به شبکه‌های تصادفی[۱]، تعلق دارند. اما اگر توزیع درجه شبکه متناسب با توزیع قانون توان به‌صورت $p(k) \sim k^{-\gamma}$ باشد(γ شاخص قانون توان و k درجه رأس متناظر)، به شبکه‌های ناهمگن تعلق دارند که

۱. بیشترین نمونه‌های بررسی‌شده این شبکه‌های نمایی، الگوی شبکه تصادفی اردوس-رنیی و الگوی جهان-کوچک واتز و استروگاتز است و هر دو الگو شبکه‌های نسبتاً همگنی را به دست می‌دهند (آلبرت و همکاران، ۲۰۰۰: ۳۷۹).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

شبکه‌های مقیاس آزاد[۱] نامیده می‌شوند. بدین‌صورت که تعدادی از رئوس مرکزی[۲]، درجه بالایی دارند اما بسیاری از رئوس شبکه درجه پایینی دارند.

۲-۲. شاخص‌های مربوط به الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی

در این قسمت برخی از شاخص‌های مربوط به شبکه معرفی می‌شوند. شاخص چگالی، متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر، ضریب خوشه و مرکزیت از آن جمله است[۳].

شاخص چگالی ارتباط تنگاتنگ تجاری[۴] میان کشورهای صادر کننده و وارد کننده در شبکه تجارت گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) را اندازه‌گیری می‌کند. هرچقدر این شاخص بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که ارتباط کشورها در کل تجارت بیشتر است. شاخص متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر بیانگر متوسط نزدیک‌ترین مسیری است که هر دو رأس در شبکه می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند. شاخص ضریب خوشه به‌منظور بررسی ارتباط تنگاتنگ تجاری بین همسایگان رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی مورداستفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بیان‌کننده تراکم یک شبکه است. مقادیر بزرگ‌تر این شاخص نشان‌دهنده این است که همسایه‌های رأس با یکدیگر ارتباط تنگاتنگ تجاری دارند.

شاخص مرکزیت درجه‌ای به بررسی این مطلب می‌پردازد که آیا شبکه محوریت آشکار دارد یا خیر؟ و اینکه آیا چند کشور دارای توانایی کنترل در شبکه وجود دارد یا خیر؟

---

۱. در این شبکه‌ها، توزیع احتمال درجه‌ای $p(k)$ از توزیع قانون توان پیروی می‌کند. شبکه‌های جهت‌دار را می‌توان توسط دو توزیع درجه‌ای توصیف کرد: $pout(k)$، توزیع درجه خروجی است که احتمال این است که یک رأس دارای درجه خروجی k باشد و $pin(k)$، توزیع درجه ورودی است که احتمال این است که یک رأس دارای درجه ورودی k باشد (آلبرت و باراباسی، ۲۰۰۲: ۵۰).

2. Hub Nodes

۳. این شاخص‌ها در جی و همکاران (۲۰۱۴) و گنگ و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است.

4. Trade Tightness

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

به دلیل جهت‌دار بودن شبکه تجاری گاز طبیعی، از مرکزیت درجه‌ای برای تجزیه‌وتحلیل درجه انحصاری در شبکه صادرات و درجه رقابتی در شبکه واردات گاز طبیعی استفاده می‌شود. این شاخص اهمیت و موقعیت کشورها در شبکه را نشان می‌دهد. این شاخص هر چقدر بزرگ‌تر باشد نشان می‌دهد که توانایی کنترل به‌طور فزاینده‌ای تنها در چند کشور متمرکزشده است. این امر دلالت بر ویژگی ناهمگن بودن کشورها در شبکه تجاری دارد.

۲-۳. ثبات تجاری

بررسی ثبات شبکه تجاری گاز باهدف قضاوت درباره کارایی نظام تجاری گاز طبیعی فعلی صورت می‌گیرد. عملکرد مطلوب یک شبکه به عکس‌العمل آن در برابر اختلال‌های داخلی و خارجی بستگی دارد. این اختلالات می‌تواند شامل خطاها، اختلال‌های تصادفی و حمله‌های هدف باشد که به دلیل معیارها و حمله‌های بدخواهانه و پایدار منجر به حذف رئوس می‌شوند. توانایی مقاومت یک شبکه در برابر این اختلالات یا به‌عبارت‌دیگر تحمل در برابر حمله‌ها، ثبات یا استحکام شبکه خوانده می‌شود (پیرونان[1] و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۸). هر چه ثبات رئوس بیشتر باشد، ثبات تجاری کشور وارد کننده گاز بیشتر خواهد شد. بنابراین بررسی ثبات تجاری در سطوح مختلف، یک رهنمود مهم برای تجزیه‌وتحلیل جامع از وضعیت الگوی تجارت گاز طبیعی است. در این پژوهش، دو شاخص ثبات رئوس و ثبات شبکه[2] در مقابل حمله‌های تصادفی و هدف[3] بررسی شده است.

1. Piraveenan

۲. این شاخص‌ها در جی و همکاران (۲۰۱۴) آورده شده است.

۳. در حمله تصادفی، رئوسی که به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده‌اند، حذف می‌شوند. حذف تصادفی رئوس می‌تواند باعث اختلال اتصالات مربوط به برخی رئوس و بنابراین اختلال در شبکه شود. در حمله هدف، رئوسی که بیشترین اتصال را دارند، انتخاب می‌شوند. زیرا رئوس با تعداد اتصالات بالا، بیشترین آسیب را به یکپارچگی شبکه وارد می‌کنند. سپس در هر مرحله، رئوس انتخابی حذف می‌شوند. بنابراین انتظار این است که با افزایش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

۳. نتایج تجربی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار نودایکس‌ال[1] و متلب[2] و با بهره‌گیری از داده‌های جدول جریان تجاری[3]، ویژگی‌های تکاملی الگوی تجارت جهانی گاز طبیعی (با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ تجزیه‌وتحلیل و مقایسه می‌شود. همچنین با توجه به ویژگی توزیع‌های به‌دست‌آمده و اتصالات شبکه، ساختار کلی شبکه، موقعیت و اهمیت کشورهای تجاری و ثبات شبکه (از طریق دو شیوه انتقال) در مقابل اختلال تجاری موردمطالعه قرار می‌گیرند.

۳-۱. روند حجم تجارت جهانی گاز طبیعی

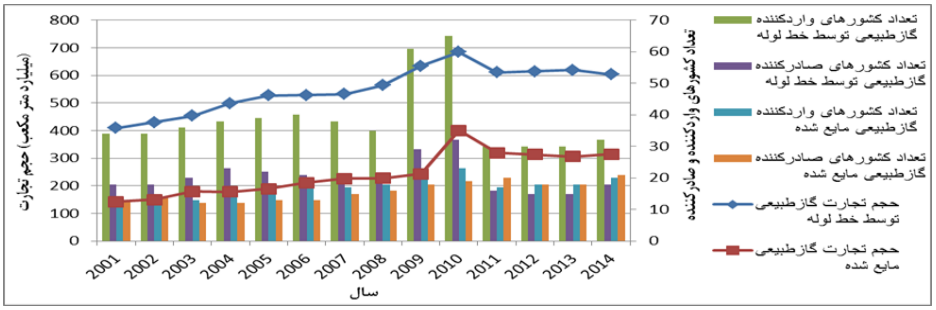
بررسی روند حجم تجارت جهانی گاز طبیعی (شکل ۱) نشان می‌دهد که این حجم (به هر دو شیوه انتقال) یک‌روند صعودی دارند. همچنین میزان تجارت با خط لوله بسیار بیشتر از مایع‌شده است. بنابراین تجارت گاز طبیعی با خط لوله طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱، یک تجارت غالب بوده است. به‌بیان‌دیگر عمده تجارت جهانی گاز طبیعی، از طریق خط لوله انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۴، سهم تجارت گاز طبیعی با خط لوله به ۶۶٪ رسیده است.

همچنین تعداد کشورهای واردکننده گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. علت این امر این است که قیمت‌های بالای جهانی نفت خام در سال ۲۰۰۸ باعث شده است تا بسیاری از کشورها به‌منظور جایگزینی مصرف نفت و اطمینان از امنیت عرضه انرژی، مصرف گاز طبیعی خود را افزایش دهند.

تعداد رئوس حذف‌شده از شبکه، اندازه بزرگ‌ترین خوشه کاهش و متوسط طول مسیر افزایش یابد (آلبرت و باراباسی۳، ۲۰۰۲: ۸۶-۸۷).

1. NodeXL
2. Matlab
۳. جدول جریان تجارت جهانی گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱، در پایگاه داده World BP Statistical Review of Energy موجود است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

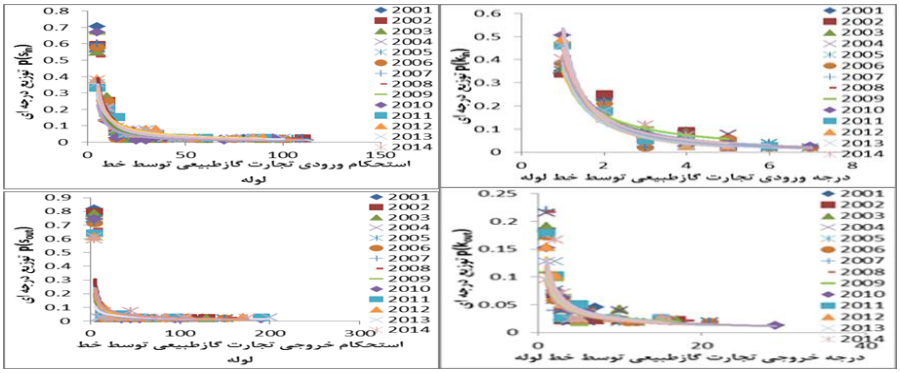


شکل ۱. روند حجم تجارت و تعداد کشورها در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی

۳-۲. توزیع درجه‌ای شبکه وزنی و بدون وزن

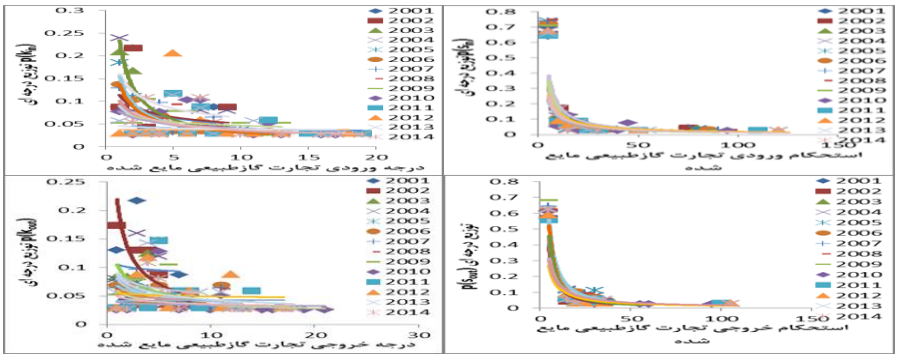
شکل‌های (۲) و (۳)، توزیع درجه‌ای شبکه تجاری وزنی و بدون وزن گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ را نشان می‌دهند. براساس این شکل‌ها، در هر دو شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده در بیشتر سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ مقادیر R^2 (که نشان‌دهنده این است که تا چه اندازه منحنی برازش مربوط به توزیع درجه‌ای در شبکه واردات و صادرات، داده‌ها را به‌خوبی برازش کرده است)، بیشتر از ۰/۶ است. این نتیجه بیانگر آن است که توزیع درجه‌ای شبکه تجارت گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال از توزیع قانون توان پیروی کرده و به توزیع درجه‌ای شبکه‌های مقیاس آزاد نزدیک است. به بیان دیگر، نقشی که کشورهای تجاری در شبکه تجاری گاز طبیعی بازی می‌کنند، به‌طور آشکار ناهمگن است؛ یعنی تعداد اندکی از کشورها درجه بالایی دارند. این ویژگی با پیوست ترجیحی که یکی از عوامل مهم در شبکه‌های مقیاس آزاد است، مطابقت می‌کند. این نتیجه به معنای آن است که بیشتر کشورهای وارد کننده برای تضمین واردات خود ترجیح می‌دهند با کشورهایی رابطه تجاری برقرار کنند که منابع غنی داشته و حجم بالایی از صادرات را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین ثبات عرضه گاز طبیعی در چند کشور اندک بزرگ صادر کننده، تأثیر به‌سزایی بر عملکرد و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی خواهد داشت.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]



(ب) (الف)

شکل۲. توزیع درجه‌ای شبکه بدون وزن (الف) و وزنی (ب): گاز طبیعی با خط لوله



(ب) (الف)

شکل۳. توزیع درجه‌ای شبکه بدون وزن (الف) و وزنی (ب): گاز طبیعی مایع‌شده

همچنین نتایج تجزیه‌وتحلیل پارامترهای به‌دست‌آمده (γ_{in} و γ_{out} به ترتیب نشان‌دهنده شاخص قانون توان مربوط به منحنی‌های توزیع درجه‌ای در شبکه واردات و صادرات است) برای شبکه‌های وزنی و بدون وزن صادرات خط لوله و شبکه بدون وزن صادرات گاز طبیعی مایع‌شده بیانگر آن است که درجه انحصاری شبکه صادرات بالاتر است. بنابراین، توزیع درجه‌ای شبکه‌های صادراتی در مقایسه با شبکه‌های وارداتی، بهتر می‌تواند ویژگی ناهمگنی و توزیع قانون توان را نمایش دهد. اما برآورد پارامترها در شبکه وزنی تجارت گاز طبیعی مایع‌شده،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

نشان‌دهنده آن است که احتمال وجود کشورها با استحکام خروجی بالا، بیشتر است. دلیل این امر این است که اگرچه تعداد کشورهای صادر کننده که دارای امکانات بیشتری در افزایش ظرفیت مایع سازی گاز طبیعی هستند، بیشتر است، اما تعداد کشورهای واردکننده‌ای که دارای امکاناتی باشند که گاز طبیعی مایع‌شده را به گاز تبدیل کنند و همچنین عملیات ذخیره‌سازی را انجام دهند، کمتر است.

۳-۳. وضعیت شاخص‌های مربوط به شبکه و تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌ها و ساختار آن‌ها

در این بخش با استفاده از نظریه شبکه پیچیده و شاخص‌های محاسبه‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱، به تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های کلی و ارتباط تنگاتنگ کشورها در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده می‌پردازیم. سپس دو شبکه مذکور را ازلحاظ موقعیت و ارتباط کشورها با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد.

همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، چگالی شبکه به هر دو شیوه انتقال به نسبت پایین است. این مطلب بدین معنی است که به‌طور عمده کشورهای صادر کننده و وارد کننده به‌طور مستقیم به تجارت با یکدیگر می‌پردازند.

روند صعودی چگالی شبکه مایع‌شده و روند نزولی شبکه خط لوله، نیز نشان می‌دهد که تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده انعطاف‌پذیرتر است. زیرا تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده نمی‌تواند توسط شرایط جغرافیایی محدود شود. بنابراین روابط تجاری بین کشورها (به عبارتی اتصالات در شبکه) را به‌سرعت افزایش می‌دهد. همچنین چگالی شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده بیشتر از چگالی شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله است. این امر نشان می‌دهد که ارتباط تنگاتنگ تجاری بین کشورهای تجاری گاز طبیعی مایع‌شده به نسبت بیشتر است. این امر به‌احتمال بسیار زیاد به دلیل کوچک‌تر بودن مقیاس تجارت توسط گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به گاز طبیعی با خط لوله است. تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده از طریق کشتی انجام می‌شود. همین شیوه انتقال باعث انعطاف‌پذیرتر بودن تجارت می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

درحالی‌که تجارت گاز طبیعی با خط لوله به زیرساخت‌های خط لوله بستگی دارد که باعث ایجاد محدودیت تجاری بین کشورها می‌شود.

جدول ۲. چگالی، متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر و متوسط ضریب خوشه شبکه

	شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله			شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده		
سال	چگالی	متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر	متوسط ضریب خوشه	چگالی	متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر	متوسط ضریب خوشه
۲۰۰۱	۰/۰۳۵۹	۲/۴۸۰۱	۰/۰۹۶	۰/۰۸۶۹	۲/۳۵۹۱	۰/۰۴۸
۲۰۰۲	۰/۰۳۵۴	۲/۴۸۸۰	۰/۰۸۸	۰/۰۹۴۸	۲/۲۵۷۰	۰/۰۸۶
۲۰۰۳	۰/۰۳۴۶	۲/۴۷۲۵	۰/۱۱۳	۰/۰۷۷۸	۲/۳۴۰۲	۰/۰۱۹
۲۰۰۴	۰/۰۳۲۹	۲/۳۹۱۸	۰/۱۱۸	۰/۰۸	۲/۳۷۱۲	۰/۰۲۰
۲۰۰۵	۰/۰۳۲۴	۲/۳۲۳۳	۰/۱۳۶	۰/۰۷۹۷	۲/۳۵۱۱	۰/۰۱۰
۲۰۰۶	۰/۰۳۲	۲/۳۰۴۶	۰/۱۳۲	۰/۰۸۸۶	۲/۲۲۳۵	۰/۰۰۹
۲۰۰۷	۰/۰۳۱۸	۲/۳۷۸۳	۰/۱۰۴	۰/۰۹۰۳	۲/۱۸۳۱	۰/۰۱۳
۲۰۰۸	۰/۰۳۳۸	۲/۴۱	۰/۱۰۱	۰/۰۹۸۷	۲/۰۸۰۰	۰/۰۲۱
۲۰۰۹	۰/۰۲۱۶	۲/۴۲۰۸	۰/۱۴۴	۰/۰۹۵۳	۲/۰۷۴۷	۰/۰۱۵
۲۰۱۰	۰/۰۱۹۱	۲/۴۵۶۶	۰/۱۲۳	۰/۱۱۲	۱/۹۸۸۱	۰/۰۴۴
۲۰۱۱	۰/۰۳۵	۲/۱۹۶۹	۰/۰۵۱	۰/۱۳۰۱	۱/۸۸۹۲	۰/۰۶۴
۲۰۱۲	۰/۰۳۳	۲/۲۱۹۴	۰/۰۴۶	۰/۱۰۳۳	۲/۰۰۵۱	۰/۰۲۶
۲۰۱۳	۰/۰۳۳۷	۲/۲۱۳۷	۰/۰۴۶	۰/۱۰۱۶	۲/۰۴۵۷	۰/۰۰۸
۲۰۱٤	۰/۰۳۵۴	۲/۴۶۱۵	۰/۰۹۲	۰/۱۱۲۶	۱/۹۶۹۳	۰/۰۹۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همچنین متوسط کوتاه‌ترین مسیر در شبکه مایع‌شده کمتر از شبکه با خط لوله است. این مطلب نشان‌دهنده آن است که رئوس بیشتری در شبکه به‌طور مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند. به عبارتی کشورها در شبکه تجارت مایع‌شده ارتباط بیشتری با یکدیگر دارند.

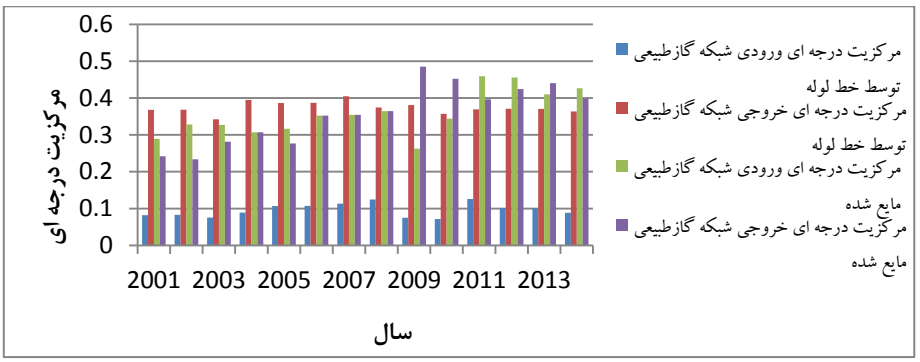
متوسط ضریب خوشه شبکه به هر دو شیوه انتقال، به نسبت پایین است. این نتیجه نشان‌دهنده تراکم پایین هر دو شبکه است. با این‌حال ملاحظه می‌شود که تراکم شبکه خط لوله بیشتر از شبکه مایع‌شده است. به عبارت دیگر، میزان ارتباط تجاری کشورها با یکدیگر از طریق خط لوله بیشتر است که حکایت از عدم قابلیت و توانایی بسیاری از کشورها در رابطه با تجارت گاز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

طبیعی مایع‌شده دارد. همچنین متوسط ضریب خوشه گاز طبیعی مایع‌شده در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ نسبت به سال‌های قبل افزایش‌یافته است. این نتیجه نشان‌دهنده افزایش تجارت گاز طبیعی مایع‌شده در این دو سال است. بنابراین می‌توان بیان داشت که تجارت گاز طبیعی مایع‌شده به دلیل پیشرفت‌های فناوری در زیرساخت‌های تولید، حمل‌ونقل و صادرات آن، در سال‌های اخیر گسترش‌یافته است.

در ادامه به تحلیل شاخص‌های متفاوت مرکزیت ازجمله مرکزیت درجه‌ای، مرکزیت نزدیکی، مرکزیت میانگی و مرکزیت بردار ویژه می‌پردازیم. این شاخص‌ها اهمیت و موقعیت کشورهای تجاری در شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده را از جنبه‌های مختلفی بررسی می‌کنند.

همان‌طور که از شکل (۴) ملاحظه می‌شود، مرکزیت درجه‌ای گاز طبیعی با خط لوله طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ یک‌روند به نسبت ثابتی، و گاز طبیعی مایع‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱ یک‌روند به نسبت صعودی دارد. این نتیجه حکایت از آن دارد که درجه انحصاری بازار صادرات گاز طبیعی مایع‌شده طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱ افزایش‌یافته است. دلیل این امر این بوده است که نسبت حجم صادرات کشورهای بزرگ صادرکننده گاز طبیعی مایع‌شده از کل حجم صادرات جهانی بسیار افزایش‌یافته است.



شکل۴. مرکزیت درجه‌ای شبکه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

به‌عبارت‌دیگر، تنها تعداد اندکی از کشورهای بزرگ صادر کننده توانایی کنترل بازار گاز طبیعی مایع‌شده را دارند. این شرایط می‌تواند منجر به افزایش رقابت شدید کشورها برای به دست آوردن منابع جهانی گاز طبیعی و ایجاد یک چالش بزرگ در جهت تضمین گاز طبیعی کشورهای وارد کننده شود.

درجه رقابتی گاز طبیعی مایع‌شده، به‌ویژه در سال‌های اخیر بیشتر از خط لوله است. این نتیجه نشان می‌دهد که تعداد اندکی از کشورهای وارد کننده با موقعیت تجاری مهم در شبکه مایع‌شده وجود دارد. اما کشورهای وارد کننده با خط لوله، موقعیت تجاری نسبتاً برابری دارند. به عبارتی در سال‌های اخیر آسیب‌پذیری شبکه مایع‌شده در برابر اختلال‌های تجاری افزایش‌یافته است. به‌علاوه، تعداد اندک کشورهای بزرگ وارد کننده در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده، حکایت از این دارد که فناوری در زیرساخت‌های لازم برای واردات گاز طبیعی مایع‌شده پیشرفت چندانی نداشته است.

متوسط مرکزیت میانگی[1] همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، در بیشتر سال‌ها متوسط مرکزیت میانگی گاز طبیعی مایع‌شده از خط لوله بیشتر است. این امر نشان‌دهنده آن است که ارتباط تجاری کشورها در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده در جهت انتقال گاز طبیعی میان سایر کشورها بیشتر است. همچنین این امر دلالت بر کارایی و ثبات کمتر شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده دارد. زیرا با حذف هر اتصال، آسیب‌پذیری شبکه افزایش می‌یابد.

۱. این شاخص بررسی می‌کند که به‌طور متوسط رئوس شبکه تا چه حدی می‌توانند سایر جفت رئوس موجود در شبکه تجاری را به هم مرتبط کنند. اگر مقدار این شاخص در شبکه بیشتر باشد، نشان‌دهنده آن است که رئوس در شبکه توانایی بیشتری در کنترل جریان منابع بین رئوس شبکه دارند. این ویژگی ساختاری، میزان کارایی و ثبات شبکه تجاری را نشان می‌دهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

متوسط مرکزیت نزدیکی[1] شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۱، از یک‌روند ثابت پیروی می‌کند (جدول۳). اما در شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله یک‌روند نوسانی وجود دارد. افزایش این شاخص نشان‌دهنده آن است که در آن سال‌ها جریان تجاری میان هر کشور تجاری در شبکه با سایر کشورها زیاد است.

مقدار این شاخص در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله بسیار کمتر است. این مطلب بدین معنی است که در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده، انتقال گاز طبیعی میان هر کشور با بیشتر کشورها بسیار کم است. این موضوع می‌تواند به دلیل نبود پیشرفت فناوری در زیرساخت‌های گاز طبیعی مایع‌شده در بسیاری از کشورها باشد.

۱. این شاخص، بیان می‌کند که به‌طور متوسط کوتاه‌ترین مسیر برای دسترسی هر رأس به سایر رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی به چه اندازه است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

جدول ۳. متوسط مرکزیت میانگی، نزدیکی و بردار ویژه شبکه

سال	شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله			شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده		
	متوسط مرکزیت میانگی	متوسط مرکزیت نزدیکی	متوسط مرکزیت بردار ویژه	متوسط مرکزیت میانگی	متوسط مرکزیت نزدیکی	متوسط مرکزیت بردار ویژه
۲۰۰۱	۳۴/۹۰۹	۰/۱۲۴	۰/۰۲۳	۳۲/۲۶۱	۰/۰۱۹	۰/۰۴۳
۲۰۰۲	۳۵/۰۹۱	۰/۱۲۴	۰/۰۲۳	۲۹/۹۱۳	۰/۰۲۰	۰/۰۴۳
۲۰۰۳	۳۴/۶۸۱	۰/۱۵۹	۰/۰۲۱	۳۳/۱۶۷	۰/۰۱۸	۰/۰۴۲
۲۰۰۴	۳۵/۶۸۶	۰/۱۸۸	۰/۰۲	۳۵/۲۸۰	۰/۰۱۸	۰/۰۴۰
۲۰۰۵	۳۵/۱۵۴	۰/۱۸۹	۰/۰۱۹	۳۷/۴۸۱	۰/۰۱۶	۰/۰۳۷
۲۰۰۶	۳۳/۱۱۵	۰/۱۸۵	۰/۰۱۹	۳۶/۴۸۳	۰/۰۱۶	۰/۰۳۴
۲۰۰۷	۳۴/۰۸	۰/۱۸۲	۰/۰۲	۳۷/۶۷۷	۰/۰۱۵	۰/۰۳۲
۲۰۰۸	۳۱/۶۵۲	۰/۲۱۶	۰/۰۲۲	۳۵/۵۶۲	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱
۲۰۰۹	۴۸/۸۱۱	۰/۱۵۹	۰/۰۱۴	۴۱/۸۴۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶
۲۰۱۰	۴۸/۸۸۶	۰/۲	۰/۰۱۳	۳۹/۵۳۸	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶
۲۰۱۱	۲۲/۸۲۱	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۱/۲۳۵	۰/۰۱۶	۰/۰۲۹
۲۰۱۲	۲۳/۲۳۱	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۵/۱۷۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۹
۲۰۱۳	۲۳/۱۲۸	۰/۲۰۴	۰/۰۲۶	۳۷/۶۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۲۹
۲۰۱۴	۳۳/۵۷۱	۰/۱۲۱	۰/۰۲۴	۳۶/۸۶۵	۰/۰۱۴	۰/۰۲۷

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با مقایسه مقدار متوسط شاخص مرکزیت بردار ویژه[1] با متوسط مرکزیت میانگی می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه در سال‌های مذکور تعداد رئوس شبکه (دارای توانایی بسیار بالایی در کنترل جریان منابع میان سایر رئوس) افزایش‌یافته‌اند، اما تعداد رئوس دارای ارزش مرکزیت بردار ویژه بالا، کاهش‌یافته است. پس لزوماً رئوس دارای ارزش مرکزیت میانگی بالا، دارای ارزش مرکزیت بردار ویژه بالا نمی‌باشند.

۱. این شاخص به‌طور متوسط اهمیت رئوس در شبکه تجاری گاز طبیعی با توجه به اهمیت همسایگان را اندازه می‌گیرد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

از جدول شماره ۳ ملاحظه می‌شود که طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۱، متوسط مرکزیت بردار ویژه شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده از خط لوله بیشتر بوده است. دلیل این امر این است که در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، به دلیل اهمیت بالای همسایگان هر رأس در شبکه، رئوس شبکه از موقعیت و اهمیت بالاتری برخوردار هستند. بنابراین شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده به دلیل افزایش ارتباطات بین رئوس شبکه، در برابر اختلال‌های تجاری آسیب‌پذیرتر است.

۳-٤. تجزیه‌وتحلیل ثبات[۱] تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده)

در این بخش به بررسی شاخص‌های ثبات رئوس و ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) در سال ۲۰۱۴ می‌پردازیم[۲].

- تجزیه‌وتحلیل ثبات کشورهای مهم وارد کننده در مناطق تجاری

با توجه به تأثیر قابل‌توجه ثبات تجاری کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی بر امنیت انرژی جهان، در این قسمت توانایی مقاومت کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی در برابر اختلال و قطع تجارت و همچنین ثبات نسبی کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی[۳] بررسی می‌شود.

در این پژوهش آلمان، ایتالیا، فرانسه و بلژیک (که بیشترین استحکام ورودی را به خود اختصاص داده‌اند) در منطقه تجاری اروپا و کشورهای چین و ترکیه در منطقه تجاری

---

۱. *ثبات* به توانایی کشورهای واردکننده گاز طبیعی برای این‌که بتوانند سریع‌تر از دیگر کشورها گاز طبیعی را وارد کنند، و *اختلال تجاری* به اختلال و قطع صادرات کشورهای صادرکننده گاز طبیعی اطلاق می‌شود.

۲. این بررسی به دلیل کامل نبودن داده‌های مربوط به شاخص ریسک سیاسی در سال‌های قبل از ۲۰۱۴ تنها در سال ۲۰۱۴ انجام‌شده است.

۳. بایستی توجه داشت که اگرچه کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی که دارای منابع غنی هستند، دارای روابط وارداتی با دیگر کشورها می‌باشند؛ اما تحت تأثیر اختلال تجاری در شبکه قرار نخواهند گرفت. بنابراین در مقاله حاضر ثبات این کشورها در نظر گرفته نمی‌شود و تنها ثبات کشورهایی در نظر گرفته می‌شود که فقط به‌عنوان وارد کننده در شبکه تجاری گاز طبیعی هستند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

آسیا-اوراسیا به‌عنوان کشورهای اصلی وارد کننده در نظر گرفته‌شده است و ثبات آن‌ها در برابر حمله هدف که منجر به قطع صادرات کشورهای صادر کننده گاز طبیعی با خط لوله در منطقه تجاری آن‌ها می‌شود، محاسبه‌شده است. همچنین کشورهای صادر کننده گاز طبیعی با خط لوله به ترتیب از درجه خروجی بیشتر به درجه خروجی کمتر برای منطقه تجاری اروپا–اوراسیا–شمال آفریقا (شامل کشورهای روسیه، نروژ، هلند، الجزایر، بریتانیا، لیبی و آذربایجان) و برای منطقه تجاری آسیا–اوراسیا (شامل کشورهای روسیه، ترکمنستان، میانمار، قزاقستان، ایران، ازبکستان و آذربایجان) انتخاب‌شده است و براساس درصدهای اختلال، اتصال‌های صادراتی آن‌ها حذف‌شده است. به عبارتی فرض شده است که به دلیل بی‌ثباتی سیاسی، اگر احتمال اختلال تجاری (قطع صادرات) در این کشورها افزایش یابد، ثبات کشورهای وارد کننده در منطقه تجاری تغییرخواهد یافت.

براساس داده‌های شاخص ثبات سیاسی[۱] کشورها، عمده کشورهای مواجه شونده با حمله هدف در قاره آسیا–اوراسیا و آفریقا قرار دارند. زیرا این کشورها میزان ثبات سیاسی کمی دارند و احتمال افزایش اختلال تجاری در این کشورها زیاد است.

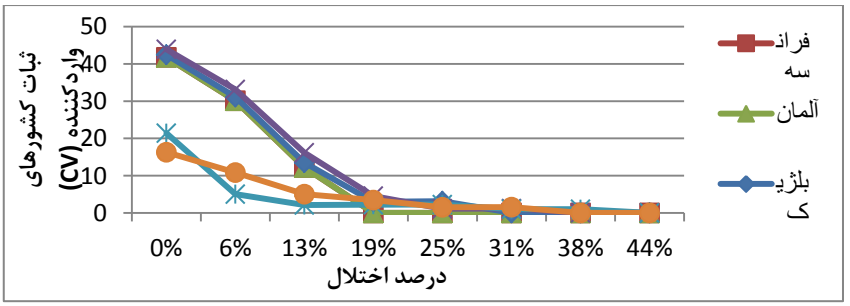
اثرات اختلال تجاری بر ثبات کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی با خط لوله در شکل (۵) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در منطقه اروپا، ثبات ایتالیا به ترتیب بیشتر از بلژیک، آلمان و فرانسه است. این امر دلالت بر آن دارد که ایتالیا دارای سیاست متنوع سازی جغرافیایی بالایی است. زیرا ایتالیا ارتباط وارداتی با ۵ کشور هلند، نروژ، روسیه، الجزایر و لیبی دارد که نسبت به کشورهای دیگر، دارای ارتباط تجاری بیشتری است و همچنین با دو کشور هلند و نروژ که از ثبات سیاسی بالایی برخوردارند، ارتباط تجاری دارد. این شرایط منجر به مقاومت بالای ایتالیا در برابر اختلال تجاری در منطقه می‌شود.

۱. این شاخص، ثبات سیاسی هر کشور را اندازه‌گیری می‌کند. مأخذ داده‌ها: *https://www.prsgroup.com*

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

همچنین ثبات تجاری هر چهار کشور زمانی که بیشتر از ۶٪ کشورهای اصلی صادر کننده با اختلال تجاری مواجه می‌شوند، به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و آسیب‌پذیری بالای آن‌ها را در برابر افزایش اختلال تجاری نشان می‌دهد. زیرا هر چهار کشور با دو کشور نروژ و هلند ارتباط تجاری دارند و در سطوح ۱۳٪ و ۱۹٪ اتصالات صادراتی نروژ و هلند (که از ثبات سیاسی بالایی برخوردارند) حذف‌شده است. بنابراین با اختلال، اتصالات صادراتی نروژ و هلند، ثبات فرانسه، آلمان، ایتالیا و بلژیک بسیار کاهش می‌یابد.

به‌علاوه ثبات دو کشور چین و ترکیه نیز با افزایش درصد اختلال، یک‌روند نزولی دارد. همان‌طور که از شکل (۵) ملاحظه می‌شود، در سطوح اولیه اختلال، ثبات کشور چین بیشتر از ترکیه است. این امر دلالت بر متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی بیشتر کشور چین دارد. با توجه به اینکه ثبات چین و ترکیه در منطقه آسیا و اوراسیا در سطوح اولیه اختلال تجاری، کمتر از کشورهای منطقه اروپا است، می‌توان چنین استدلال کرد که چین و ترکیه نسبت به آلمان، فرانسه، ایتالیا و بلژیک با کشورهای دارای ثبات سیاسی پایین‌تر ارتباط وارداتی دارند.



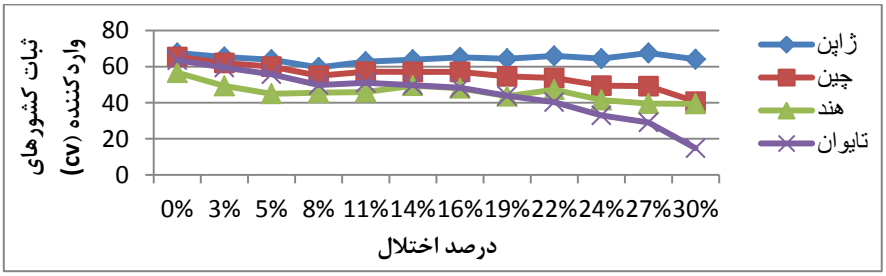
شکل۵. ثبات کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی با خط لوله در دو منطقه اروپا و آسیا

در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، کشورهای ژاپن، چین، هند و تایوان (که بیشترین استحکام ورودی در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده را به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای اصلی واردکننده در نظر گرفته‌شده است و ثبات آن‌ها در برابر حمله هدف

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

محاسبه‌شده است. در این مقاله، برای شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، ۲۱ کشور صادرکننده انتخاب‌شده و براساس درصد اختلال، اتصال‌های صادراتی آن‌ها حذف‌شده است.

اثرات اختلال تجاری بر کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی مایع‌شده (شکل ۶) متفاوت از خط لوله است. در این حالت ثبات هر ۴ کشور ژاپن، چین، هند و تایوان با افزایش درصد اختلال، کاهش یافته است.



شکل۶. ثبات کشورهای اصلی واردکننده گاز طبیعی در شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع‌شده

همچنین آسیب‌پذیری کشور تایوان نسبت به سه کشور دیگر با شدت بیشتری افزایش‌یافته است. دلیل این امر این است که تایوان دارای سیاست متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی پایین‌تری است. به‌علاوه ملاحظه می‌شود که از سطح اختلال ۳٪ تا سطح اختلال ۳۰٪، ثبات کشور ژاپن از سه کشور دیگر بیشتر است. این امر به این دلیل است که ژاپن گاز طبیعی مایع‌شده موردنیاز خود را از ۱۹ کشور وارد می‌کند که نسبت به کشورهای دیگر از سیاست متنوع سازی جغرافیایی و امنیت منابع وارداتی بالاتری برخوردار است. ثبات کشور چین نیز در تمام سطوح اختلال تجاری، از ثبات کشورهای هند و تایوان در برابر اختلال اتصال‌های صادراتی کشورهای صادر کننده، بیشتر است که نشان‌دهنده متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی بالای این کشور نسبت به هند و تایوان است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

- تجزیه‌وتحلیل اهمیت کشورهای مهم صادرکننده در مناطق تجاری

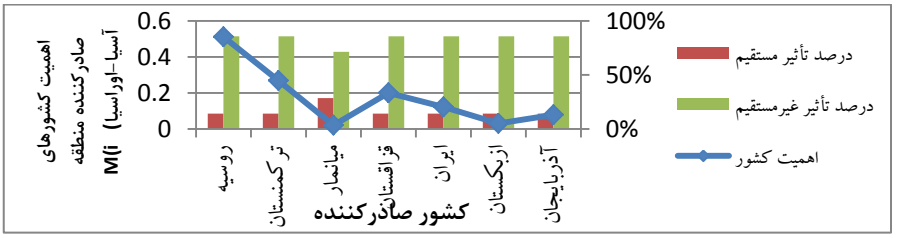
ویژگی مقیاس آزاد شبکه صادرات گاز طبیعی با خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده، بااهمیت بودن کشورهای بزرگ صادرکننده را تأیید می‌کند. بنابراین ضروری است تا موقعیت و تأثیر کشورهای اصلی صادرکننده گاز طبیعی با هر دو شیوه انتقال بررسی شود. به‌علاوه، در این بخش تأثیر مستقیم و غیرمستقیم اختلال تجاری هر یک از کشورهای صادرکننده بر ثبات تجاری کشورهای واردکننده گاز طبیعی در هر دو شبکه تجارت گاز طبیعی بررسی‌شده است[۱].

براساس شکل (۷) و (۸) بااهمیت‌ترین کشورهای صادرکننده گاز طبیعی با خط لوله شامل روسیه و ترکمنستان در منطقه تجاری آسیا-اوراسیا، و روسیه و نروژ و هلند در منطقه تجاری اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا است. قطر و مالزی و استرالیا نیز به‌عنوان بااهمیت‌ترین کشورهای صادرکننده گاز طبیعی مایع‌شده بوده و نقش به‌سزایی در حفظ ثبات تجاری دارند.

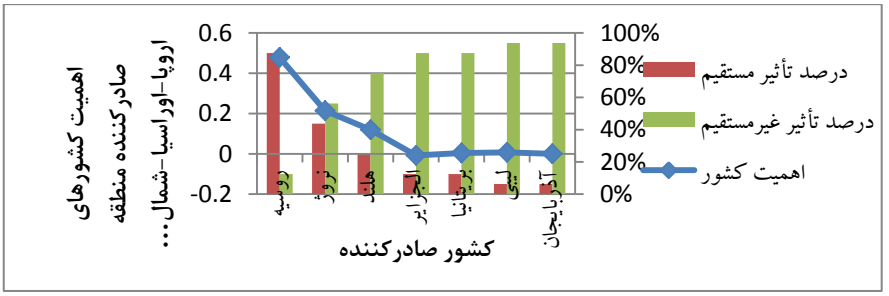
ایران به‌عنوان دومین دارنده منابع گاز دنیا پس از روسیه و قرار گرفتن در بین ۱۰ تولیدکننده بزرگ گاز طبیعی جهان، به دلایلی نتوانسته است در بین صادرکنندگان برتر جهان جایگاهی داشته باشد و تنها به صادرات گاز به ترکیه به‌صورت محدود بسنده کرده است. همچنین به دلیل نبود سرمایه‌گذاری کافی در زیرساخت‌های لازم برای تولید گاز طبیعی مایع‌شده، هیچ نقشی در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده ایفا نمی‌کند. به عبارتی ایران تنها کشور صادرکننده گاز طبیعی است که گاز خود را تنها از طریق خط لوله منتقل می‌کند.

۱. محاسبه درصد تأثیر مستقیم بر اساس این است که از میان تمام کشورهای واردکننده در شبکه، چه نسبتی از کشورهای واردکننده دارای ارتباط تجاری مستقیم با کشور صادرکننده هستند. اختلال تجاری کشور صادرکننده بر ثبات تجاری آن کشورها تأثیر داشته است. درصد تأثیر غیرمستقیم، سهم دیگر کشورهای تأثیر پذیرفته از میان تمام کشورهای واردکننده در شبکه تجاری گاز طبیعی است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

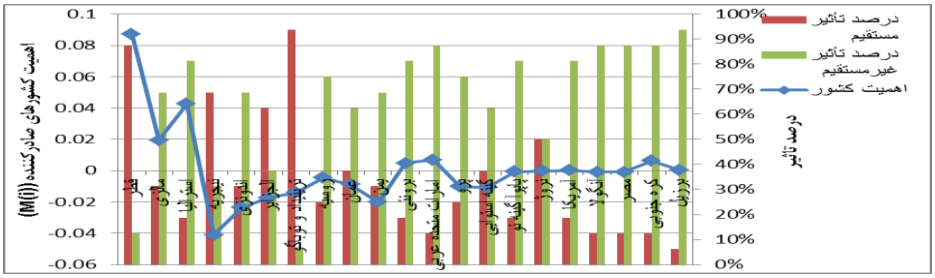


(الف)



(ب)

شکل۷. موقعیت و تأثیر کشورهای صادرکننده گاز طبیعی با خط لوله در دو منطقه
(الف) آسیا- اوراسیا (ب) اروپا- اوراسیا- شمال آفریقا



شکل۸. موقعیت و تأثیر کشورهای صادرکننده گاز طبیعی مایع‌شده

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

- تجزیه‌وتحلیل ثبات مناطق تجاری

در این قسمت، ثبات شبکه تجاری گاز طبیعی[1] در دو حالت حمله هدف و حمله تصادفی[2] در سال ۲۰۱۴ تجزیه‌وتحلیل می‌شود.

براساس شکل ۹، نتایج به‌دست‌آمده از تغییرات ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله (منطقه اروپا-اوراسیا-شمال آفریقا و آسیا-اوراسیا) نشان می‌دهد که هر دو منطقه در برابر حمله تصادفی، مقاوم هستند. زیرا با افزایش درصد اختلال، ثبات هر دو منطقه به‌تدریج کاهش می‌یابد. درحالی‌که در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر هستند. بنابراین می‌توان چنین استدلال کرد که هر دو منطقه تجاری توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی رادارند اما در برابر حمله هدف بسیار آسیب‌پذیر هستند.

براساس نتایج نشان داده‌شده در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که شبکه فعلی تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، در برابر حمله تصادفی مقاوم است. دلیل این امر این است که با افزایش درصد اختلال، تغییرات ثبات شبکه بسیار کم است و دارای یک‌روند ثابتی است. همچنین ثبات این شبکه در برابر حمله هدف در بعضی سطوح اختلال افزایش‌یافته است که دلالت بر مقاومت

---

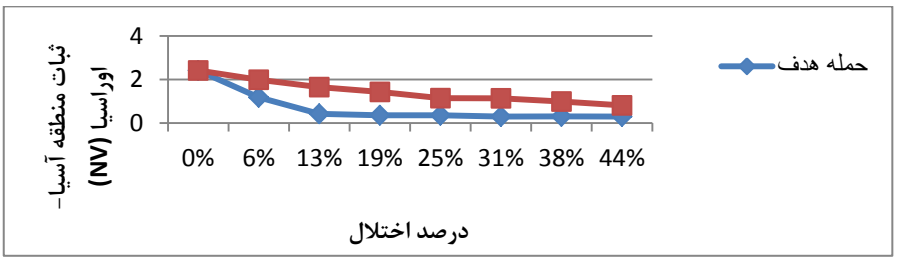
۱. این شاخص توانایی واکنش شبکه تجاری در برابر اختلال صادرات و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی را محاسبه می‌کند.

۲. حمله تصادفی به معنای آن است که کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به‌منظور حذف تمام‌اتصال‌های صادراتی آن‌ها، به‌طور تصادفی و با یک درصد معینی انتخاب‌شده‌اند. سپس فرآیند انتخاب تصادفی با درصدهای مختلف اختلال، صد مرتبه تکرار و میانگین ثبات شبکه محاسبه شده است. این روش به روش مونت‌کارلو مرسوم است. حمله هدف نیز به معنای آن است که کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به‌منظور حذف اتصال‌های صادراتی‌شان، به ترتیب از درجه خروجی بیشتر به درجه خروجی کمتر، بر اساس درصدهای اختلال انتخاب می‌شوند. درصدهای اختلال، درصدی از کشورهای صادر کننده از کل کشورهای موجود در مناطق گاز طبیعی با خط لوله و شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده هستند که با حمله هدف مواجه شده‌اند.

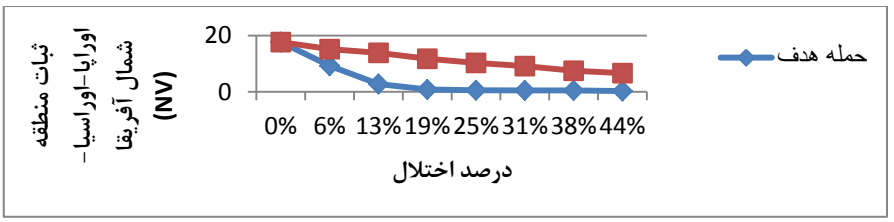
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

شبکه در آن سطح داشته است. اما در بیشتر سطوح اختلال، ثبات شبکه کاهش‌یافته است. این امر دلالت بر آسیب‌پذیری بیشتر شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده دارد.

نتیجه‌گیری کلی به‌دست‌آمده از شکل‌های (۹) و (۱۰) این است که ثبات هر دو شبکه تجاری گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) در حالت حمله تصادفی از حالت حمله هدف بیشتر است. بنابراین می‌توان چنین استدلال کرد که شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی را دارند. این در حالی است که اگر شبکه در برابر حمله هدف قرار گیرد، بسیار آسیب‌پذیر است و در سطوح بالای اختلال می‌تواند منجر به فروپاشی شبکه شود. این شرایط با دارا بودن ویژگی مقیاس آزاد شبکه تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) مطابقت می‌کند.



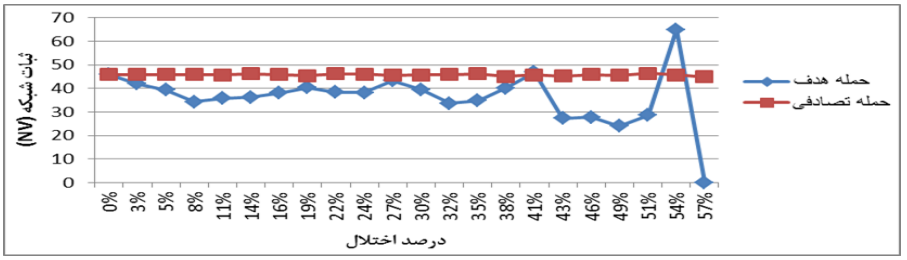
(الف)



(ب)

شکل۹. ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله
(الف) آسیا- اوراسیا (ب) اوراپا- اوراسیا- شمال آفریقا
در برابر حمله هدف و حمله تصادفی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]



شکل۱۰. ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع‌شده در برابر حمله هدف و حمله تصادفی

۳-۵. تجسم شبکه

تجسم شبکه تجارت گاز طبیعی، درواقع به‌منظور مقایسه سریع‌تر دو شبکه مذکور و همچنین یافتن کشورهای تجاری مهم و اتصالات مهم میان کشورهای تجاری گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال، انجام می‌گیرد. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به‌منظور تجسم شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده و گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۱۴، یک شبکه با توجه به درجات ورودی و یک شبکه با توجه به درجات خروجی رئوس رسم شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تمام رئوس در شبکه تجارت گاز طبیعی مایع‌شده به هم متصل هستند. درحالی‌که، بسیاری از رئوس در شبکه تجارت گاز طبیعی با خط لوله از هم جدا هستند. دلیل این امر این است که زیرساخت خط لوله، پیش‌نیاز تجارت گاز طبیعی با خط لوله است و همچنین زیرساخت خط لوله به عواملی نظیر محدودیت‌های جغرافیایی، روابط دیپلماتیک ملی و عوامل سیاسی بستگی دارد؛ درحالی‌که تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، هیچ محدودیت جغرافیایی ندارد. بنابراین تجارت گاز طبیعی مایع‌شده، انعطاف‌پذیرتر است.

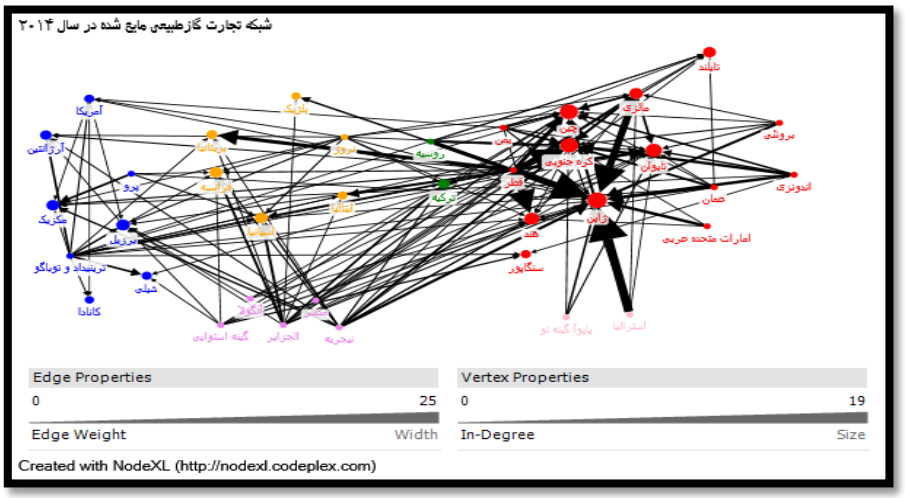
آسیا به‌عنوان مرکز واردات جهانی گاز طبیعی مایع‌شده است و تجارت گاز طبیعی مایع‌شده بیشتر در آسیا متمرکزشده است (شکل۱۱). همچنین در شبکه گاز طبیعی مایع‌شده، قطر، مالزی، استرالیا، نیجریه، اندونزی، الجزایر و ترینیداد و توباگو (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه صادرات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان مهم‌ترین کشورهای صادر کننده هستند و

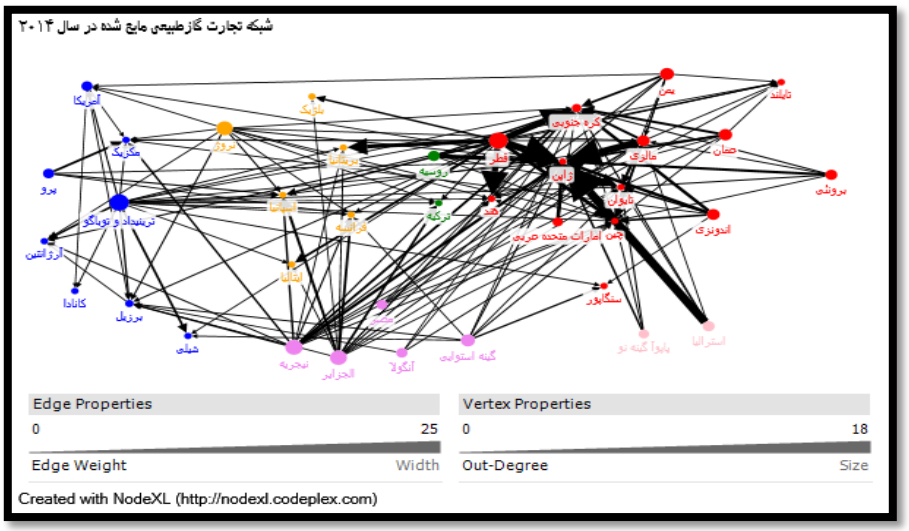
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

ژاپن، کره جنوبی، چین، هند و تایوان (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه واردات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان بزرگ‌ترین کشورهای وارد کننده هستند.

با توجه به شکل (۱۲)، در شبکه گاز طبیعی با خط لوله روسیه، نروژ، کانادا، هلند، آمریکا، ترکمنستان و قطر (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه صادرات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای بزرگ و مهم صادر کننده هستند و آلمان، آمریکا، ایتالیا، ترکیه، بریتانیا، چین و فرانسه (که به ترتیب بیشترین استحکام را در شبکه واردات به خود اختصاص داده‌اند) به‌عنوان کشورهای بزرگ وارد کننده هستند. مناطق وارد کننده گاز طبیعی با خط لوله به‌طور عمده در شمال آمریکا و اروپا متمرکزشده است. تجارت گاز طبیعی از طریق خط لوله به‌عنوان تجارت اصلی گاز طبیعی در بازار آمریکای شمالی است و ایالات‌متحده آمریکا به‌طور عمده گاز طبیعی را از کانادا و مکزیک توسط خط لوله وارد می‌کند. در بازار گاز طبیعی اروپا، عمدتاً تجارت گاز طبیعی به هر دو شیوه انتقال انجام می‌شود و کشورهای اروپایی به‌طور عمده گاز طبیعی را از قطر، نروژ، روسیه و الجزایر وارد می‌کنند.

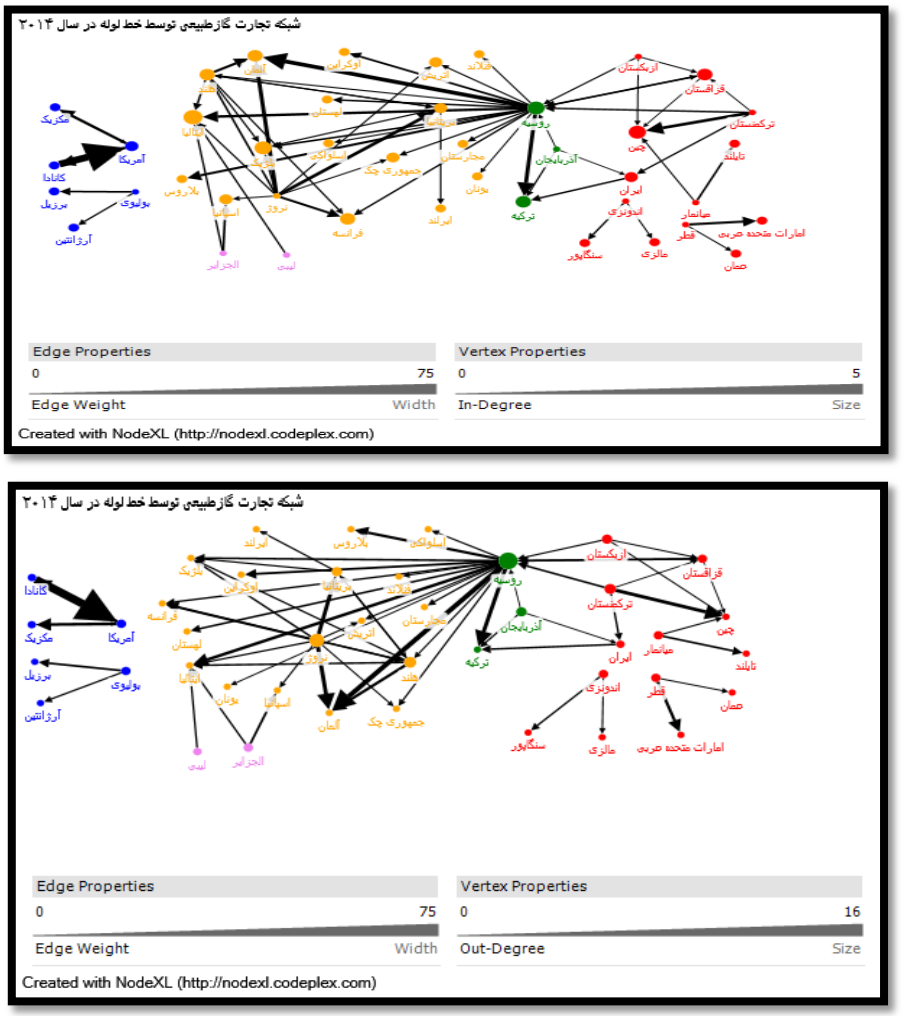
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]





شکل۱۱. نمایش شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی مایع‌شده در سال ۲۰۱۴

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]



شکل۱۲. نمایش شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی با خط لوله در سال ۲۰۱۴

٤. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از نظریه شبکه پیچیده، ویژگی‌ها و ساختار شبکه تجارت گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) شناسایی و بررسی شد. همچنین به‌منظور بررسی ثبات تجارت گاز طبیعی و اطمینان از امنیت انرژی هر کشور، ثبات و اهمیت کشورهای تجاری و ثبات کل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) در برابر اختلال تجاری، تجزیه‌وتحلیل شد. به‌طور خلاصه می‌توان نتایج حاصل از بررسی را به‌صورت زیر بیان کرد.

- توزیع درجه‌ای شبکه تجاری گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال)، به ساختار شبکه‌های مقیاس آزاد نزدیک‌تر است. زیرا هر دو شبکه تجاری گاز طبیعی از توزیع قانون توان پیروی کرده است و دارای ساختار به نسبت ناهمگنی هستند. به این معنا که تعداد اندکی از کشورهای صادر کننده دارای بیشترین منابع گاز طبیعی هستند و کشورهای وارد کننده گاز طبیعی بیشتر متمایل هستند تا به ایجاد روابط تجاری باثبات با این کشورها، اولویت دهند. لذا انتظار می‌رود که واکنش شبکه تجاری گاز طبیعی در برابر حمله تصادفی مقاوم و در برابر حمله هدف آسیب‌پذیر باشد. درواقع کشورهای بزرگ صادرکننده گاز طبیعی، رئوس کلیدی برای حفظ روابط شبکه تجاری هستند و درنتیجه نیرومحرکه عملکرد و کارایی شبکه تجاری گاز طبیعی هستند. به‌این‌ترتیب به‌منظور ایجاد تلاش مشترک کشورها برای حفظ ثبات صادرات کشورهای بزرگ صادر کننده و ثبات شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی، می‌بایست نظام همکاری چندین کشور ایجاد شود.
- چگالی هر دو شبکه تجارت جهانی گاز طبیعی (خط لوله و گاز طبیعی مایع‌شده) به نسبت پایین است. دلیل این امر این است که به‌طور عمده کشورهای تجاری، به‌طور مستقیم به تجارت با یکدیگر می‌پردازند. بااین‌حال، به دلیل روند صعودی چگالی شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده و روند نزولی چگالی شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله، تجارت به شیوه انتقال گاز طبیعی مایع‌شده انعطاف‌پذیرتر است. همچنین متوسط کوتاه‌ترین طول مسیر در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده کمتر از شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله است. این امر دلالت بر این دارد که رئوس بیشتری در شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده، به‌طور مستقیم با یکدیگر در ارتباط هستند. درحالی‌که متوسط ضریب خوشه یا به عبارتی تراکم شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله بیشتر از شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده است. این امر نشان‌دهنده این است که به دلیل عدم قابلیت و توانایی بسیاری از کشورها در رابطه با تجارت از طریق

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

گاز طبیعی مایع‌شده، میزان ارتباط تجاری کشورها با یکدیگر از طریق تجارت گاز طبیعی با خط لوله بیشتر است.

- شاخص مرکزیت یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین موقعیت و روابط کشورها در شبکه تجاری است. نتایج نشان می‌دهند که به‌جز شاخص متوسط مرکزیت نزدیکی، سه شاخص مرکزیت درجه‌ای، متوسط مرکزیت میانگی و متوسط مرکزیت بردار ویژه، آسیب‌پذیری بیشتر شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده را نسبت به شبکه تجاری گاز طبیعی با خط لوله در برابر اختلال‌های تجاری در شبکه تأیید می‌کند. این امر نشان‌دهنده این است که امکان دارد شبکه‌ای دارای رئوس با مرکزیت نزدیکی پایین باشد اما به دلیل ارتباطات زیاد رئوس با یکدیگر، دارای موقعیت و اهمیت تجاری بالا باشد.
- کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی، بر مناطق تجاری خاص خود تمرکز دارند. به‌طور خلاصه، روسیه و ترکمنستان در منطقه تجاری آسیا–اوراسیا و روسیه و نروژ و هلند در منطقه تجاری اروپا–اوراسیا–شمال آفریقا به‌عنوان بااهمیت‌ترین کشورهای صادرکننده در شبکه گاز طبیعی با خط لوله هستند. قطر، مالزی و استرالیا نیز به‌عنوان بااهمیت‌ترین کشورهای صادر کننده گاز طبیعی مایع‌شده در شبکه تجاری مربوطه، نقش به سزایی در حفظ ثبات تجاری دارند. زیرا در صورت اختلال تجاری در صادرات هر یک از این کشورها، تهدید جدی برای ثبات کل شبکه تجاری ایجاد می‌شود و بر امنیت عرضه کشورهای وارد کننده گاز طبیعی تأثیر می‌گذارد. کشورهای بزرگ صادر کننده گاز طبیعی نقش مهمی در ثبات تجارت جهانی گاز طبیعی ایفا می‌کنند و حفظ ثبات تجاری این کشورها، منافع تمام کشورهای جهان را تضمین می‌کند. بنابراین کشورها نیاز خواهند داشت تا همکاری‌های بین‌المللی خود را تقویت کنند. از طرف دیگر کشورهای اصلی وارد کننده گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) به‌منظور توسعه راهبردهای خود برای اطمینان از عرضه دریافتی خود، می‌بایست در بهبود متنوع سازی جغرافیایی منابع وارداتی خود و همچنین برقراری ارتباط با کشورهای صادر کننده که دارای شرایط باثبات سیاسی هستند، تلاش کنند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

- نتایج حاصل از بررسی ثبات مناطق تجاری گاز طبیعی با خط لوله و شبکه تجاری گاز طبیعی مایع‌شده در برابر حمله تصادفی و حمله هدف در شبکه نشان‌دهنده آن است که هر دو شبکه توانایی مقاومت در برابر اختلال تجاری تصادفی رادارند. این در حالی است که اگر شبکه در برابر حمله هدف قرار گیرد، بسیار آسیب‌پذیر است. در این حالت امنیت وارداتی کشورهای وارد کننده گاز طبیعی با تهدید جدی روبه‌رو خواهد شد. درواقع، این شرایط با دارا بودن ویژگی مقیاس آزاد شبکه تجارت گاز طبیعی (با هر دو شیوه انتقال) مطابقت می‌کند.

منابع

شیرازی، همایون؛ آذربایجانی، کریم و مرتضی سامتی (۱۳۹۴)، "بررسی جایگاه ایران در تجارت بین‌المللی: یک رهیافت شبکه"، *مجله تحقیقات اقتصادی*، شماره ۴، صص ۹۰۲-۸۸۱.

Albert, R. and A.L. Barabasi (2002). "Statistical Mechanics of Complex Networks", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 74, pp. 47-97.

Albert R., Jeong H. and A.L. Barabasi (2000). "Error and Attack Tolerance of Complex Networks", *Nature*, Vol. 406, pp. 378-382.

An H., Zhong w., Chen Y., Li H. and X. Gao (2014). "Features and Evolution of International Crude Oil Trade Relationships: A Trading-Based Network Analysis", *Energy*, Vol. 74, pp. 254-259.

Baskaran T., Blochi F., Bruck T. and F.J. Theis (2011). "The Heckscher-Ohlin Model and the Network Structure of International Trade", *International Review of Economics and Finance*, No. 20, pp. 135-145.

Bhattacharya K., Mukherjee G., Sarämaki J., Kaski K. and S.S. Manna (2008). "The International Trade Network: Weighted Network Analysis and Modeling", *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, No. 2, pp. 1-5.

Du R., Dong G., Tian, L., Wang Y., Liu Y., Wang M. and G. Fang (2016). "A Complex Network Perspective on Features and Evolution of World Crude Oil Trade", *Energy Procedia*, Vol. 104, pp. 221-226.

Du R., Wang Y., Dong G., Tian L., Liu Y., Wang M. and G. Fang (2017). "A Complex Network Perspective on Interrelations and Evolution Features of International Oil Trade, 2002–2013", *Applied Energy*, Vol. 196, pp. 142-151.

Duenas M. and G. Fagiolo (2011). "Modeling the International-Trade Network: A Gravity Approach", *Journal of Economic Interaction and Coordination*, No. 8, pp. 155-178.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

Fagioloa G., Reyesb J. and S. Schiavoc (2008). "On the Topological Properties of the World Trade Web: A Weighted Network Analysis", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 387, pp. 3868-3873.

Fan Y., Ren S., Cai H. and X. Cui (2014). "The State's Role and Position in International Trade: A Complex Network Perspective", *Economic Modelling*, No.39, pp. 71-81.

Furusawa, T. and H. Konishi (2007). "Free Trade Networks", *Journal of International Economics*, Vol. 72, pp. 310–335.

Garlaschelli D. and M.I. Loffredo (2005). "Structure and Evolution of the World Trade Network", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 355, pp. 138–144.

Geng J.B., Ji Q. and Y. Fan (2014). "A Dynamic Analysis on Global Natural Gas Trade Network", *Applied Energy*, Vol. 132, pp. 23-33.

Greaney T.M. (2005). "Measuring Network Effects on Trade: Are Japanese Affiliates Distinctive?", *Journal of the Japanese and International Economies*, No.19, pp. 194-214.

Ji Q., Zhang H.Y. and Y. Fan (2014). "Identification of Global Oil Trade Patterns: An Empirical Research Based on Complex Network Theory", *Energy Conversion and Management Paper*, Vol. 85, pp. 856-865.

Kali R. and J. Reyes (2006). "The Architecture of Globalization: A Network Approach to International Economic Integration", *Journal of International Business Studies*, Vol. 38, pp. 595-620.

Lee j. (2012). "Network Effects on International Trade", *Economic Letters*, Vol.116, pp. 199-201.

Li X., Jin Y.Y. and G. Chen (2003). "Complexity and Synchronization of the World Trade Web", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 328, pp. 287-296.

Nagayama D. and M. Horita (2014). "A Network Game Analysis of Strategic Interactions in the International Trade of Russian Natural Gas Through Ukraine and Belarus", *Energy Economics*, No. 43, pp. 89-101.

Piraveenan M., Uddin S., and K.S.K. Chung (2012). "Measuring Topological Robustness of Networks Under Sustained Targeted Attacks". *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, Vol.1,pp. 38-45.

Serrano M.A. and M. Boguna (2003). "Topology of the World Trade Web" *Physical Review E*, No. 68, 015101(R).

Sgrignoli P., Metulini R., Schiavo S. and M. Riccaboni (2015). "The Relation Between Global Migration and Trade Networks", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 417, pp. 245-260.

Shaffer B. (2012). "Natural Gas Supply Stability and Foreign Policy", *Energy Policy*, Vol. 56, pp. 114-125.

Smith D.A. and D.R. White (1992). "Structure and Dynamics of the Global Economy: Network Analysis of International Trade 1965-1980", *Social Forces*, No. 70, pp. 857-893.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]

Sun Q., Gao X., Zhong W. and N. Liu (2017). "The Stability of the International Oil Trade Network from Short-Term and Long-Term Perspectives", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Vol. 482, pp. 345-356.

Zhang H.Y., Ji Q. and Y. Fan (2014). "Competition, Transmission and Pattern Evolution: A Network Analysis of Global Oil Trade", *Energy Policy*, Vol. 73, pp. 312-322.

Zhang J., Cui Z. and L. Zu (2013). "The Evolution of Free Trade Networks", *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 38, pp. 72-86.

Zhong W., An H., Gao X. and X. Sun (2014). "The Evolution of Communities in The International Oil Trade Network", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, No. 213, pp. 1-19.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-18]